UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

AFFECTATION DES CAMIONS DANS LA MINE DE MONT-WRIGHT

par

François Soumis

CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS

CASE POSTALE 6128, SUCCURSALE A, MONTRÉAL, QUÉBEC, H3C 3J7

AFFECTATION DES CAMIONS DANS LA MINE DE MONT-WRIGHT

par

François Soumis

Ce rapport a été publié grâce à une subvention du fonds F.C.A.C. pour l'aide et le soutien à la recherche.

Université de Montréal

Centre de recherche sur les transports - Publication #266

Juin 1982

Dépôt légal - 4e trimestre 1982

RÉSUMÉ

Le problème consiste à déterminer en temps réel l'utilisation des camions transportant le minerai et le stérile dans une mine à ciel ouvert. Il y a avantage à effectuer les affectations en temps réel plutôt que de suivre une cédule pré-établie de façon à s'adapter aux fluctuations des temps de parcours et de chargement des camions et à éviter les attentes inutiles.

Le système proposé comprend deux modules. Un premier détermine pour la période considérée le nombre de camions à charger à chaque pelle et les routes utilisées de façon à maximiser la productivité tout en conservant des moyennes de dureté de teneur de minerai satisfaisantes. Ce module évalue l'extraction de minerai et de stérile possible avec la flotte de camions et le nombre et la position des pelles.

L'utilisation interactive de ce module permettra aux responsables des opérations d'équilibrer les ressources pour atteindre la productivité désirée. Ce module est très important car la productivité des affectations en temps réel peut être fortement handicapée par un débalancement des pelles et des camions.

Le second module affecte en temps réel chaque camion ayant terminé son voyage en considérant des estimés de l'heure à laquelle chaque pelle sera disponible et les heures où seront libres les prochains camions. Les affectations seront décidées en utilisant une méthode d'intelligence artificielle qui consiste à explorer implicitement l'arbre des possibilités

pour affecter les prochains camions (de 5 à 10 camions). On retient la suite d'affectations qui minimise l'espérance de l'écart entre l'activité des pelles et celle prévue par le plan d'extraction calculé par le module précédent. Le prochain camion est affecté en accord avec la première affectation de cette suite. Les estimations d'heures de disponibilité des pelles et des camions sont recalculées avec les nouvelles informations reçues et un nouvel arbre est exploré pour effectuer l'affectation suivante.

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction. 1

2. Approche. 1

2.1 Plan d'extraction. 2

2.2 Affectation des camions. 3

3. Calcul du plan d'extraction 4

3.1 Description du réseau. 4

3.2 L'objectif 6

3.3 Méthode de résolution. 8

4. Calcul des affectations 9

4.1 Données utilisées. 10

4.2 Fonction d'évaluation d'une affectation. 13

4.3 Algorithme 14

5. Conclusion. 17

Remerciements 19

. 20

- - - - - - - - - - - - - - -

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Réseau utilisé par les camions 5

Figure 2 : Arbre des possibilités d'affectations. 9

- - - - - - - - - - - - - - -

1. INTRODUCTION

Un système d'affectation contrôlé par ordinateur est déjà en opération. L'équipement de communication de ce système est fort élaboré et assure un repérage fiable des camions et transmet les affectations sans ambiguité. Par contre, le logiciel effectuant les affectations est peu élaboré. Le fonctionnement qui en résulte est loin de la productivité maximale et présente de plus des variations importantes de teneur et de dureté du minerai.

Ce système, malgré ses faiblesses, permet sûrement une meilleure productivité qu'un contrôle manuel car il assure au moins une surveillance constante des conducteurs de camions.

Nous proposons une méthodologie plus élaborée pour effectuer les affectations. Cette méthodologie, même si elle n'est pas optimale, devrait donner de meilleurs résultats car elle utilisera un algorithme mathématique d'optimisation et considérera une vue d'ensemble de la mine au temps présent et dans une proche futur.

2. APPROCHE

Le problème de l'affectation des camions est décomposé en deux modules:

A - déterminer un plan d'extraction à court terme ;

B - affecter un à un les camions en accord avec le plan d'extraction.

2.1 Plan d'extraction

Le problème A détermine pour la période à considérer le nombre de camions à charger à chaque pelle et les routes utilisées de façon à maximiser la productivité tout en conservant des moyennes de dureté et de teneur satisfaisantes. Ce problème considère que les attentes moyennes à chaque pelle ou au concasseur augmentent en fonction de la fréquence d'arrivée des camions. L'optimisation de ce problème réduira les attentes évitables et assurera ainsi une répartition de l'activité entre les pelles et entre le transport du minerai et du stérile.

Ce problème devra être résolu le matin lors de la mise au point du plan minier de la journée. Il permettra d'évaluer la compatibilité entre la flotte de camions disponibles et le nombre et la position des pelles. En donnant l'activité de chaque pelle, les prévisions d'extraction de minerai et de stérile ce modèle permettra de modifier l'affectation des pelles jusqu'à ce que l'extraction prévue soit satisfaisante. Une analyse de sensibilité donnant l'effet sur la productivité de modifier l'extraction de chaque pelle sera disponible pour guider les modifications. On pourra aussi, quand la capacité des pelles est excédentaire, favoriser ou limiter l'activité de certaines pelles en accord avec des objectifs à plus long terme qui ne sont pas présents dans ce modèle, en connaissant les coûts à court terme de ces décisions par l'analyse de sensibilité.

Ce même problème devra être résolu au cours de la journée à chaque fois qu'il faudra réadapter le plan d'extraction. Les adaptations seront nécessaires lors de pannes de pelles ou modifications de leurs affectations, lors de variation importante du nombre de camions ou de leur vitesse. Une

adaptation pourrait aussi être nécessaire pour corriger un écart de teneur ou de dureté.

Ce problème de planification pourra être résolu de façon optimale avec des techniques mathématiques car il n'a pas à être résolu en temps réel à chaque affectation.

2.2 Affectation des camions

Le problème B affecte en temps réel chaque camion ayant terminé son voyage en considérant la disponibilité des pelles, les camions en route et l'attente prévisible au concasseur. Les affectations seront réalisées en s'approchant le plus possible de l'activité prévue à chaque pelle par le plan d'extraction à court terme. Remarquons que même si une pelle est disponible, un camion pourra être assigné à une autre pelle avec une courte attente si c'est nécessaire pour réaliser le plan d'extraction et que cette attente est acceptable en accord avec l'attente moyenne prévue à cette pelle par le plan.

Le système d'affectation surveillera toutes les activités des camions, il assurera un retour en temps au concasseur pour faire le plein ou pour la relève du conducteur. Il pourra limiter l'accès de certains camions à certaines routes si nécessaire.

Les calculs pour effectuer une affectation seront limités à l'environnement des camions et pourront s'effectuer en temps réel avec l'ordinateur existant. La compatibilité globale et une certaine optimalité seront assurées par le plan d'extraction qui est calculé en temps différé.

3. CALCUL DU PLAN D'EXTRACTION

Le plan d'extraction sera déterminé en résolvant un problème de réseau. Les variables sont les nombres de camions chargés à chaque pelle et voyageant sur chaque route pendant la période considérée. Les seules contraintes explicites sont les contraintes de conservation de flot, (i.e.: le nombre de camions qui arrivent à un point est égal au nombre qui en partent). Les contraintes de teneur, de dureté, de nombre total de camions et de limite d'activité imposées à une pelle seront exprimées sous forme de coût dans un objectif non-linéaire. Cet objectif contiendra aussi une mesure de la production.

3.1 Description du réseau

Le réseau représenté à la figure 1 comprend deux noeuds, un d'arrivée et un de départ à chaque point où il peut y avoir attente de camion, c'est-à-dire aux pelles et au concasseur. Chaque dépôt de stérile donne lieu à un seul noeud car on considère que les camions peuvent y décharger sans attendre. Aux pelles et au concasseur, un arc d'attente relie le noeud d'arrivée et le noeud de départ. Le temps de parcours d'un tel arc comprend un temps constant de chargement ou de déchargement et un temps d'attente moyen qui est fonction croissante du nombre de camions utilisant cet arc. Les fonctions d'attente moyennes à une pelle $T_p(X_p)$ et au concasseur $T_o(X_o)$ seront évaluées en utilisant la théorie des files d'attente. Ces résultats théoriques pourront être validés avec les attentes observées. Des arcs correspondant aux déplacements possibles des camions, des pelles vers le concasseur, et les dépots de stérile et inversement complètent le réseau. Le temps de parcours de chacun de ces arcs est considéré constant,

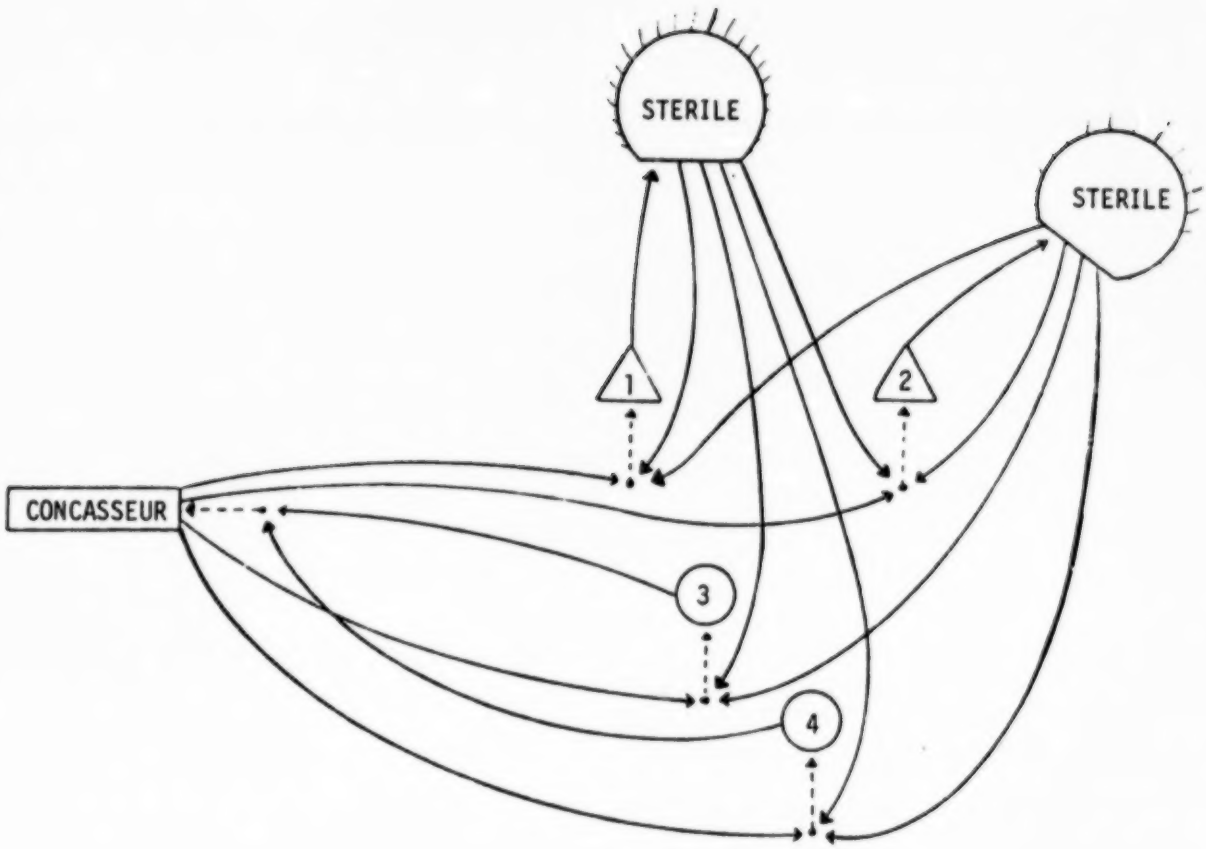

Figure 1 : Réseau utilisé par les camions

Légende : ◯ pelle dans le minerai

△ pelle dans le stérile

<----• arc d'attente

<——• arc de déplacement

ces constantes seront toutefois réajustées en fonction du jour et de l'heure en accord avec les moyennes observées.

Pour une mine avec 15 pelles et 5 dépôts de stérile, on obtient un réseau de 40 noeuds et de moins de 100 arcs. Un réseau de cette taille demande moins de 1000 mots de mémoire et se traite en quelques secondes, même sur un petit ordinateur.

3.2 L'objectif

L'objectif consiste à maximiser la valeur de la production et comprend plusieurs termes. Le premier terme mesure la valeur du minerai extrait

$$C_1(X) = V_1 \times \Sigma X_p \qquad (1)$$

La somme est effectuée sur les pelles chargeant du minerai et V_1 et la valeur moyenne d'un chargement de camion. Un second terme mesure la valeur du stérile extrait

$$C_2(X) = V_2 \times \Sigma X_p \qquad (2)$$

La somme est effectuée sur les pelles chargeant du stérile et V_2 est une valeur attribuée à un chargement de stérile. On prendra $V_1 > V_2$ si on donne priorité au transport du minerai.

Un troisième terme (en négatif dans l'objectif) mesure la perte associée aux écarts de teneurs

$$C_3(X) = f\left(\frac{\Sigma X_p t_p}{\Sigma X_p}\right) \qquad (3)$$

Les sommes sont effectuées sur les pelles chargeant du minerai et t_p représente la teneur pour la pelle p. La fonction f sera évaluée à partir de la publication de Dallaire, Laplante et Elbrond intitulée "Humphreys' Spiral Tolerance to Feed Variation", The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, August 1978. Pour les teneurs trop élevées on évalue la valeur du fer perdu. Pour les teneurs trop faibles il y a aussi du fer perdu, mais surtout moins de fer expédié pour un même coût d'extraction et de concentration.

Un quatrième terme en négatif représente une barrière sur le nombre de camions utilisés. Le modèle devrait inclure une contrainte du type suivant:

$$\sum_a d_a \times X_a \leq \text{nombre de camions x durée} \qquad (4)$$

La somme porte sur tous les arcs de transport et d'attente, X_a est le nombre de camions utilisant cet arc et d_a le temps d'un passage sur l'arc. Cette somme représente le nombre total d'heures de camion utilisées pendant la période considérée. Ce nombre d'heures doit être inférieur au nombre de camions multiplié par la durée de la période considérée. Pour conserver la structure du réseau, cette contrainte est remplacée par une barrière dans l'objectif

$$C_4(X) = B\,(\text{nombre de camions x durée} - \sum_a d_a X_a) \qquad (5)$$

La fonction B(Y) est définie pour $Y > 0$, elle reste pratiquement nulle pour $Y > 1$ et décroît vers $-\infty$ quand Y décroit vers 0. On pourrait utiliser $B(Y) = -1/Y$.

Remarquons que la contrainte de dureté moyenne du minerai est aussi incluse dans la barrière (5). L'attente moyenne au concasseur est fonction du nombre de camions par unité de temps et de la dureté du minerai extrait. Si on transportait du minerai trop dur, l'attente au concasseur augmenterait, la production diminuerait et la solution ne serait pas optimale.

D'autres termes peuvent être ajoutés à l'objectif sous forme de barrières $C_5(X)$ si on veut imposer une activité minimum ou maximum à une pelle ou à un groupe de pelles. Ces barrières devront être utilisées avec prudence car elles diminuent l'optimalité de la solution. Une analyse de sensibilité indiquera le coût d'imposer chacune de ces barrières. L'utilisateur prendra ses décisions en considérant les coûts actuels et les bénéfices futurs correspondant au plan minier qu'il impose.

3.3 Méthode de résolution

Nous devons résoudre le problème suivant

$$\max Z(X) = C_1(X) + C_2(X) - C_3(X) + C_4(X) + C_5(X)$$

s.a. conservation de flot

$$x \geq 0 \quad .$$

La fonction Z(X) étant conservée, ce problème se résoud facilement. Nous proposons d'utiliser la méthode du gradient réduit. Cet algorithme est disponible sur l'ordinateur CDC de l'Université de Montréal pour effectuer des essais et pourrait être adapté facilement sur le P.D.P. avec la mémoire actuelle.

4 CALCUL DES AFFECTATIONS

Les affectations seront effectuées par une méthode d'énumération implicite des possibilités. Ces méthodes d'intelligence artificielle ont entre autres fait leur preuve dans les programmes d'ordinateur jouant aux échecs. Elles sont aussi à la base des "Branch and Bound" qui sont les méthodes les plus efficaces pour résoudre les problèmes d'optimisation en nombre entier. Elles consistent à décider d'une affectation en explorant l'arbre des possibilités pour cette affectation et les suivantes. Un tel arbre est représenté à la figure 2.

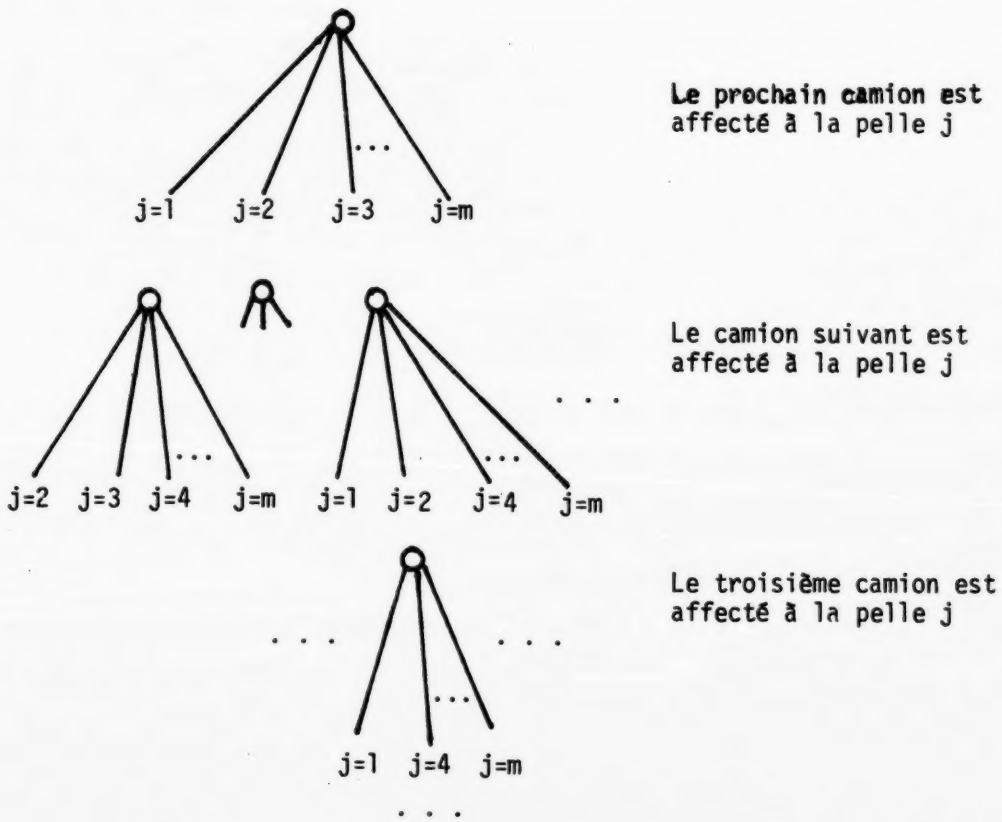

Figure 2 : Arbre des possibilités d'affectations

Le nombre de niveaux explorés dépendra de la vitesse de calcul de l'ordinateur et de la précision des estimations de temps. On ne peut pas explorer plus loin que l'ordinateur a le temps d'effectuer le calcul entre deux affectations. D'autre part, à mesure que l'on descend dans l'arbre on s'éloigne dans le futur et les prévisions d'heures auxquelles les camions et les pelles seront libres sont de moins en moins précises et l'exploration n'est plus significative au-delà d'un certain niveau. Une étude de la variabilité des estimations permettra de choisir le nombre de niveaux qui sera sûrement entre 3 et 10. Le système actuellement en opération explore seulement le premier niveau.

Une autre amélioration par rapport au système actuel sera le choix du critère d'évaluation. Le système actuel utilise l'attente du prochain camion à la pelle. Le système proposé considère l'attente du prochain camion et d'autant de camions suivants que de niveaux d'arbre explorés ainsi que l'attente des pelles. Ces attentes ne sont plus minimisées de façon myope en oubliant l'ensemble du problème, mais rapprochées le plus possible de celles prévues par le plan d'extraction calculé par le premier module. On assure ainsi le respect des contraintes de teneur et de dureté et on obtient une activité de chaque pelle près de la productivité optimale calculée par le premier module.

4.1 Données utilisées

On estime où et quand les prochains camions seront libres pour affectation en utilisant les heures de passage aux balises et les temps moyens de parcours et de déchargement. De même on estime les heures où chaque pelle aura fini de servir les camions déjà affectés. Les notations suivantes sont utilisées pour formaliser ces données.

$i=1,..,n$: les prochains camions à affecter.

t_i : heure à laquelle sera libre le camion i. (t_i est une variable aléatoire)

$\hat{t}_i$: estimé de t_i. (Les camions sont numérotés dans l'ordre croissant des $\hat{t}_i$)

$\sigma(\hat{t}_i)$: écart type de l'estimateur $\hat{t}_i$.

$k=1,..,K$: les lieux de déchargement.

k_i : lieu de déchargement du camion i.

$j=1,..,m$: les pelles.

h_j : heure à laquelle la pelle j devrait avoir fini de servir les camions qui lui sont affectés. On utilise comme temps de chargement le même temps moyen que lors du calcul du plan. Ainsi quand l'attente calculée égale l'attente prévue par le plan, la fréquence de chargement égale celle prévue par le plan. Le temps de chargement moyen est utilisé même si le chargement est terminé et a une durée différente.

(k,j) : déplacement permis d'un camion vide à partir du lieu k vers la pelle j. (Habituellement les déplacements permis seront seulement ceux utilisés dans le plan d'extraction. Au besoin on permettra les déplacements nécessaires pour ramener un camion au concasseur pour le plein ou pour la relève du conducteur)

h_{kj} : heure à laquelle un camion doit quitter le lieu k pour arriver à la pelle j à l'heure h_j. (variable aléatoire)

$\hat{h}_{kj}$: estimé de h_{kj}.

$\sigma(\hat{h}_{kj})$: écart type de l'estimateur $\hat{h}_{kj}$.

Les attentes résultant des affectations possibles sont exprimées avec les notations suivantes :

A^p_{ij} : attente de la pelle j avant l'arrivée du camion i si ce dernier lui est affecté.

$$A^p_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si } t_i \leq h_{k_i j} \\ t_i - h_{k_i j} & \text{si } t_i > h_{k_i j} \end{cases} .$$

$E(A^p_{ij})$: espérance de l'attente de la pelle (cette espérance sera calculée en supposant la normalité des variables aléatoires t_i et h_{kj} et en utilisant les paramètres estimés $\hat{t}_i$, $\hat{h}_{kj}$, $\sigma(\hat{t}_i)$, $\sigma(\hat{h}_{kj})$).

A^c_{ij} : attente du camion i avant le début du service par la pelle j s'il y est affecté.

$$A^c_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si } t_i \geq h_{k_i j} \\ h_{k_i j} - t_i & \text{si } t_i < h_{k_i j} \end{cases} .$$

$E(A^c_{ij})$: espérance de l'attente du camion.

Remarquons que quand t_i est près de $h_{k_i j}$ on peut obtenir $E(A^p_{ij}) > 0$ et $E(A^c_{ij}) > 0$. C'est-à-dire qu'il y a simultanément une probabilité d'attente pour la pelle et le camion qui lui est affecté. L'importance de ce chevauchement est proportionnel aux écarts types des estimations d'heures.

p^c_j : attente moyenne des camions à la pelle j suivant le plan d'extraction calculé par le module 1.

p^p_j : attente moyenne de la pelle j entre deux camions, suivant le plan d'extraction.

4.2 Fonction d'évaluation d'une

Considérons un noeud de l'arbre de profondeur n correspondant à l'affectation des n prochains camions.

j_i, i=1,..,n sont les pelles auxquelles sont affectés ces camions.

La fonction d'évaluation comprend trois termes considérant respectivement l'attente des n camions, l'attente des n pelles qui les servent et l'attente des m-n pelles qui ne reçoivent pas de camions. Chacun de ces termes mesure l'écart entre les attentes résultant de l'affectation et les attentes correspondantes prévues par le plan d'extraction calculé par le module A.

Le premier terme associé aux n camions se calcule :

$$f_1 = K_i \sum_{i=1}^{n} (E(A^c_{i\ j_i}) - p^c_{j_i})^2 \qquad (6)$$

La constante K_1 pondère le coût d'attente des camions par rapport à celui des pelles. De même le second terme associé aux n pelles se calcule :

$$f_2 = \sum_{i=1}^{n} (E(A^p_{i\ j_i}) - p^p_{j_i})^2 \qquad (7)$$

Le troisième terme est défini par :

$$f_3 = \sum_{j \in J} (E(A^p_{i_j j}) - p^p_j)^2 \qquad (8)$$

où J_1 est l'ensemble de m-n pélles ne recevant pas de camions et i_j le camion qui sera plus tard affecté à la pelle j. ($n+1 \leq i_j \leq m$ mais inconnue).

Ce troisième terme ne peut pas être calculé car il dépend d'affectations futures. Une borne inférieure peut être obtenue en considérant que les camions suivant les n camions assignés seront libres après l'heure t_n.

Une pelle à laquelle on affecterait le $i^{ème}$ camion $i \geq n$ attendrait donc au moins autant que si on lui affectait le $n^{ième}$ camion.

$$E(A^p_{ij}) \geq E(A^p_{nj}) \tag{9}$$

Si l'attente $E(A^p_{nj})$ dépasse déjà P^p_j (l'attente prévue par le plan) l'erreur ne pourra qu'être augmentée avec un $i^{ème}$ camion affecté après t_n

$$E(A^p_{nj}) \geq P^p_j \Rightarrow (E(A^p_{ij})-P^p_j)^2 \geq (E(A^p_{nj})-P^p_j)^2 \tag{10}$$

Par contre, si l'attente $E(A^p_{nj})$ est encore inférieure à la prévision P^p_j l'erreur pourra être diminuée en affectant un $i^{ième}$ camion après t_n. La seule borne inférieure dont on dispose pour l'erreur dans ce cas est la borne triviale :

$$(E(A^p_{ij}) - P^p_j)^2 \geq 0 \tag{11}$$

Soit $J_2 \subseteq J_1$, l'ensemble des pelles où l'attente dépasse déjà celle prévue par le plan.

$$J_2 = \{j \mid E(A^p_{nj}) \geq P^p_j,\ j \in J_1\}$$

En combinant (10) et (11) nous obtenons la borne :

$$f_3 = \sum_{j \in J_1} (E(A^p_{i_j j}) - P^p_j)^2 \geq f'_3 = \sum_{j \in J_2} (E(A^p_{nj})-P^p_j)^2 \tag{12}$$

4.3 Algorithme

Comme il n'est pas possible d'explorer l'arbre complet (qui est d'ailleurs infini) dans le temps disponible entre deux affectations la qualité de la solution trouvée dépend de la performance de l'algorithme.

Plus on explore de bons noeuds, meilleure sera la solution trouvée. On développera donc une structure de données et des procédures de calcul permettant d'explorer rapidement les noeuds. La performance sera aussi augmentée en utilisant des critères permettant d'identifier et d'explorer au début les noeuds qui ont une plus grande probabilité d'être bons.

La structure de données comprendra :

LC : la liste des camions dans l'ordre où ils seront disponibles (ordre croissant des $\hat{t}_i$). Chaque élément de la liste comprendra le numéro du camion, l'heure à laquelle il est prévu qu'il sera libre ($\hat{t}_i$) et le lieu où il sera (k_i). Cette liste aura une structure de double pointeur permettant de la parcourir dans les deux sens et de la modifier facilement.

LP_k : les listes des pelles accessibles à partir de chaque lieu k. Il y a k listes, ordonnées suivant l'heure à laquelle il faut quitter le lieu k pour atteindre la pelle j dès qu'elle est libre (ordre croissant des $\hat{h}_{kj}$ pour la liste LP_k). Chaque pelle j apparaît une fois dans la liste LP_k si le déplacement (k,j) est permis. Ces k listes sont aussi à double pointeur pour faciliter la consultation et la modification.

On peut maintenant préciser l'arbre présenté à la figure 2. Les niveaux correspondent à l'ordre des éléments de LC. A un niveau i les branches de gauche à droite correspondent dans l'ordre aux éléments de LP_{k_i} qui n'ont pas été affectés à un niveau supérieur.

Avec l'arbre présenté dans cet ordre, les branches les plus à droite à partir d'un noeud ont une faible probabilité d'être bonnes. Elles

correspondent à affecter un camion libre à une pelle qui le sera beaucoup plus tard, il en résulte un coût d'attente du camion qui a peu de chance d'être compensé par des réductions d'attente ailleurs. On peut calculer une borne inférieure sur l'attente dans les branches à droite d'une branche donnée.

L'exploration de l'arbre sera effectuée en descendant plus rapidement du côté gauche de l'arbre que du côté droit. Au noeud 1 on évalue les branches correspondant aux premiers éléments de LP_{k_1} (entre 2 et 5) jusqu'à ce que l'attente commence à augmenter et que la borne inférieure sur les branches plus à droite atteigne une certaine valeur. Pour chacun de ces noeuds de niveau 2, on évalue aussi les branches correspondant aux premiers éléments de LP_{k_2} et ainsi de suite pour les niveaux suivants.

Si tous les noeuds de niveau 2 sont devenus plus coûteux que la borne sur les branches non encore explorées au niveau 1 on développe de nouvelles branches au niveau 1 avant d'aller au niveau 3. On continue l'exploration de l'arbre en se limitant d'abord aux branches de gauche, mais en revenant aux niveaux supérieurs pour explorer des branches plus à droite si les premières branches s'avèrent décevantes quand on descend dans l'arbre.

On explore autant de noeuds que le temps le permet et on retient le meilleur trouvé. Il correspond à une affectation $(j_i, i=1,..,n)$. On envoie alors le camion 1 à la pelle j_1. Les autres affectations (2 à la pelle j_2, ..., n à la pelle j_n) ne sont pas définitives. On recalcule les temps $\hat{t}_i$ et $\hat{h}_{kj}$ avec la nouvelle information reçue, on remet en ordre les listes LC et LP_k et on recommence l'exploration d'un arbre pour affecter le camion

suivant. La remise en ordre se fera rapidement avec un "bubble sort" car les listes sont déjà presque en ordre.

5. CONCLUSION

Cette approche permet d'affecter les camions en considérant la plupart des facteurs influençant la productivité de la flotte.

Le premier module procurera des gains de productivité en permettant d'ajuster, dans une interaction homme-machine, la disposition des pelles avec les objectifs de production. Cet ajustement préalable des pelles, en connaissant les effets sur la production, est très important car même le meilleur algorithme d'affectation des camions ne peut organiser un transport économique de minerai de la teneur désirée si les pelles sont mal placées. Ce premier module calcule de plus un niveau d'activité de chaque pelle qui maximise la productivité tout en assurant la teneur. Cette optimisation identifie les circuits que les camions doivent utiliser, circuits d'un voyage de stérile, circuit d'un voyage de minerai ou transport de stérile et de minerai dans un même circuit.

La formulation mathématique et la méthode de résolution du premier module sont nouvelles dans ce domaine d'application. Par contre, ce sont des méthodes qui ont permis des progrès importants dans le traitement des problèmes de plusieurs autres domaines du transport.

D'autres facteurs peuvent être ajoutés à ce premier module sans compliquer sa résolution. Si des camions et des pelles de différentes grandeurs sont utilisées, on peut considérer les temps de charger chaque type de

camion à chaque type de pelle pour que l'optimisation favorise les meilleurs combinaisons pelle-camion. Si l'on veut limiter la teneur en titane, il suffira d'ajouter une pénalité supplémentaire dans l'objectif.

Le second module, en utilisant une méthode assez élaborée, devrait permettre d'atteindre en fonctionnement le niveau de production du plan optimal. L'énumération implicite est nouvelle dans ce domaine d'application mais c'est une méthode qui a prouvé son efficacité pour traiter de nombreux problèmes.

Des mesures cumulatives de production et de teneur seront évaluées à chaque affectation. Si les écarts par rapport aux prévisions sont trop grands, le fonctionnement ne suit pas le plan. Les écarts peuvent être dus à la faiblesse des affectations mais souvent ils seront causés par des variations du nombre de pelles ou de camions, par des temps de parcours ou de chargement différents de ceux utilisés lors du calcul du plan. Pour effectuer le rattrapage et s'adapter à la nouvelle situation, il faut calculer un nouveau plan.

On peut aussi ajouter des mesures d'écart de teneur et de retard de production dans la fonction d'évaluation des noeuds de façon à favoriser les affectations permettant de rattraper les objectifs. Ce rattrapage résorbe une partie des écarts et limite le besoin de recalculer un nouveau plan.

Certains ajustements restent à faire mais l'approche proposée est assez souple pour les inclure sans compliquer la résolution.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier MM. Jorgen Elbrond, Guy Lapalme et Jean-Marc Rousseau pour les discussions qui lui ont permis de mettre au point cette méthodologie.

BIBLIOGRAPHIE

1. Canadian Mining Journal, "Mount Wright, the computerized iron mine". Southam Business Publication, mars 1975.

2. Chatterjee, P.K., Brake, D.J., "Truck Dispatching and Simulation Methods in open-pit operations", CIM Bulletin, Vol. 74, november 1981.

3. Compagnie minière Québec Cartier, "Manuel de répartition des camions", février 1979.

4. Dallaire, R., Laplante, A., Elbrond J., "Humphrey's Spiral Tolerance to Feed Variations", Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, août 1978.

5. Dessureault, M., Galibois, A., "Short-Term Truck Scheduling in Open - Pit Mines". Séminaire CIM, Ottawa, 1973.

6. Elbrond, J., "The capacity of an open pit mine by a modification of the queuing theory for closed circuits". TIMS-ORSA Meeting, Toronto, mai 1981.

7. Hauck, R.F.,"Computer-controlled truck dispatching in open-pit mines". Computer Methods for the 80's.

8. Nerramen, L.K., Graefe, P.W.V., Chan, A.W.,"Computer-aided study of truck dispatching in an open-pit mine". Computers, Vol. 10, No. 1, janvier 1981, National Research Council, Canada.

9. Soukup, J., "Control of grade fluctuation in mining operation". Internal report 71/91, Department of Energy, Mines and Resources, Canada.

10. White, J.W., Arnold, M.J., Clevenger, J.G., "Automated open-pit mine dispatching at Tyrone". Seminar in Information Systems Technology in the Mineral Industry, Denver, novembre 1081.

11. Wilke, F.L., Heck, K., "Simulation Studies on Truck Dispatching". 17th APCOM Symposium proceding, 1982.